019.941:535.36

# СПЕКТРЫ СВЕТА, РАССЕЯННОГО В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Light Scattering Spectra of Solids. Proceedings of International Conference of Light Scattering of Solids held at New York University, New York, September 3—6, 1968. Springer-Verlag New York Inc, 1969, 763 pp.

Это — первая большая международная конференция, в работе которой приняло участие 225 физиков из разных стран мира. Ей предшествовал международный коллоквиум по спектрам света, рассеянного в кристаллах (Париж, 1965 г.), труды которого поместились в одном ноябрьском номере «Journal de physique» за 1965 г.

В рецензируемом томе трудов собрано около 80 работ, представленных на конференцию ведущими специалистами. В работах изложены результаты экспериментального и теоретического исследования спектров света рэлеевского, комбинационного и мандельштам-бриллюэновского рассеяний, вызванных различными физическими причинами и при различных внешних условиях.

Лазерные источники света, вошедшие в практику лабораторных работ, сделали возможными такие исследования, которые раньше были неосуществимы, что и привело к значительному увеличению объема оптических исследований вообще и спектров рассеяния твердым телом в частности.

Среди совсем новых результатов в этой области для примера назовем комбинационное рассеяние света (КРС) на поляритонах, спиновых волнах или магнонах и плазмонах.

По замыслу организаторов конференции ее тематика не должна была совпадать с тематикой, обычной для конференций по нелинейной и квантовой оптике.

Внимание участников конференции было сосредоточено на фундаментальных физических проблемах, связанных с процессами в твердом теле при разных условиях, которые можно эффективно изучать по спектрам рассеянного света. Таких проблем оказалось много.

Труды конференции несколько условно разделены на восемь следующих разделов:

A — фононы и поляритоны (7 работ); B — фононы (12 работ);

C — магноны и другие электронные возбуждения (10 работ);

D — свободные носители (8 работ); E — фононы, резонансное рассеяние, металлы, структурные эффекты (9 работ);

F — смешанные кристаллы и точечные дефекты (12 работ);

G — рассеяние Мандельштама — Бриллюэна (10 работ) и H — фазовые переходы и рассеяние в критической точке (11 работ).

Работы A-7, B-4, D-8, F-8 и G-1 представлены физиками Советского Союза.

Тщательному теоретическому рассмотрению подвергнуты вопросы поляритонного КРС в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

Явление поляритонного КРС уже наблюдено в спектре света, рассеянного кристаллами кварца, GaP и ZnO. Обсуждается связь между поляритонным КРС, электрооптическим эффектом и параметрическим усилением. Особенное внимание уделено поляритонному КРС в многоатомных кристаллах и интенсивности соответствующих линий КРС. Рассчитана эффективность КРС на «мягкой» моде (мода, обусловливающая линию КРС, претерпевающую наибольшие изменения при фазовом превращении) в ферроэлектрических кристаллах $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $Ba_2NaNb_3O_{15}$, $LiTaO_3$ и $LiNbO_3$. Расчет доведен до численной величины. Теоретически рассмотрена кинетика КРС на «мягкой»

моде антиферроэлектрических кристаллов. Экспериментально изучено поведение линий КРС при фазовых превращениях в кристаллах кварца, $NH_4Br$, $NH_4Cl$, $KH_2PO$ и $SrTiO_3$. Изучено вынужденное КРС в монокристалле $\alpha$-кварца в интервале температур от 2 до 300° К. При гелиевых температурах при вынужденном КРС наблюдалось также инфракрасное излучение. Установлена возможность экспериментального изучения электронного возбуждения КРС, обусловленного переходами в поне металла, вкрапленного в кристаллы бромистого и хлористого кадмия. Приведены результаты экспериментального определения поперечного сечения КРС в кристаллах и порошках. Бросается в глаза большое количество работ, посвященных исследованию КРС второго порядка. Обстоятельно обсуждаются спектры КРС второго порядка в кристаллах NaF, KF, RbF, NaCl, KBr, KJ, $KNO_3$ и $NaNO_3$. Излагаются и обсуждаются экспериментальные результаты КРС второго порядка в кристаллах NaCl, MgO и кубических модификациях кристаллов ZnS, ZnSe, ZnTe, GaP и гексагональных ZnS и SiC. Наблюдена полоса КРС второго порядка в GaP, в которой выявлены два максимума интенсивности, не нашедшие пока объяснения. Такой интерес к изучению КРС второго порядка вызван открывшейся возможностью сравнительно просто наблюдать явление и получать существенные данные о фононном спектре.

Обширный экспериментальный и теоретический материал получен при изучении КРС, вызванного спиновыми волнами или магнонами и другими видами электронного возбуждения в полупроводниках и других средах.

Изучены дисперсионные соотношения для магнонов в таких антиферромагнетиках, как $MnF_2$ и $FeF_2$ магнон-магнонные взаимодействия в кристаллах $RbMnF_3$ и $CoF_2$. Показано существование спиновых волн в парамагнитной фазе (парамагноны), которые наблюдались в КРС в кристаллах $NiF_2$ и $RbNiF_3$. При изучении КРС в кристалле $MnF_2$, в который включались $Ni^{2+}$ и $Fe^{2+}$ были обнаружены магноны, локализованные на этих ионах.

Приведены результаты экспериментального исследования КРС, обусловленного перебросом спина в кристалле CdS. Обсуждено влияние магнитного поля на КРС и инфракрасное поглощение в полупроводниках с примесями и на рассеяние в твердотельной плазме. В самое последнее время выполнены интересные опыты по изучению рассеяния света в твердотельной плазме, в полупроводниках.

Гораздо раньше изучено рассеяние света в газообразной плазме, причем установлено, что рассеянный свет состоит из двух частей — рассеяния на невзаимодействующих электронах, передающего распределение электронов по скоростям, и из рассеяния, обусловленного плазменными волнами.

Хотя в твердотельной плазме картина явления сложней, чем в газообразной плазме, оба указанных вида рассеяния света были обнаружены в полупроводниках. Первый из видов рассеяния на электронах наблюдался в GaAs, CdTe и AlSb на дырках в $p$-типе GaAs и $n$-типе на эпитаксиальном GaAs. Измерено поперечное сечение рассеяния в зависимости от концентрации электронов в интервале $10^{14}$—$10^{19}$ $см^{-3}$. Получено полное согласие распределения интенсивности по частоте с максвелловским распределением электронов по скоростям. Изучено рассеяние света, обусловленное плазмон-фононным взаимодействием в интервале температур от комнатной до гелиевой и развита теория рассеяния на плазменных волнах.

Развита теория КРС, обусловленного уровнями Ландау. Измерено абсолютное изменение поперечного сечения КРС, когда величина энергии оптического фонона приближается к величине энергетического зазора щели в полупроводнике CdS и ZnSe. Изучена температурная зависимость интенсивности и ширины линии КРС во многих полупроводниках в интервале температур от 10 до 475° К.

Многие металлы имеют структуру, которая может характеризоваться оптической колебательной ветвью. Например, обычная гексагональная структура с плотной упаковкой в каждой элементарной ячейке имеет два атома и характеризуется двумя оптическими ветвями.

Эти соображения послужили основанием для поисков КРС в металлах, и оно действитетельно было обнаружено в Zn (70 $см^{-1}$), Mg (120 $см^{-1}$), Bi (65, 90 $см^{-1}$), Be (455 $см^{-1}$), AuAl (266 $см^{-1}$). В другой работе излагается теория КРС в металлах.

Значительный интерес представляет группа работ, посвященная влиянию электрического поля на КРС. В частности, наблюдается влияние электрического поля на интенсивность линии КРС в алмазе и резонансное влияние электрического поля на рассеяние на продольных и поперечных оптических фононах в $n$- и $p$-типах InSb. Обширный экспериментальный и теоретический материал относится к исследованию КРС в смешанных кристаллах $CaF_2$ — $SrF_2$; $GaAs_xP_{1-x}$; $PlO_3$ и твердых растворов $NaTaO_3$ — $KTaO_3$ и $KTaO_3$ — $KNbO_3$; КРС в кристаллах с примесями и, в частности, молекулярными примесями в щелочно-галоидных кристаллах и на $F$-центрах.

Широко применяется тепловое или спонтанное и вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна (ТРМБ) и ВРМБ для изучения различных физических вопросов.

Исследуется четырехфотонное взаимодействие в жидкостях и ВРМБ в плавленном кварце. Изучается (ТРМБ) и ВРМБ в жидкости при переходе ее в стеклообразное состояние. Оба вида рассеяния используются для определения коэффициента

поглощения звука частоты $\sim 3 \cdot 10^{10}$ *гц* в $\alpha$-кварце в интервале температур от 80 до 600° К. Измерение коэффициента затухания гиперзвука выше 100° К недоступно другим способам.

Наблюдены компоненты ТРМБ, обусловленные продольными и поперечными дебаевскими тепловыми волнами в GaP и $LiNbO_3$ и на основании полученных спектров определены упругие постоянные $C_{ik}$ этих кристаллов.

В кристаллах CdS и ZnO в режиме звуковой неустойчивости, когда скорость дрейфа электронов во внешнем электрическом поле больше скорости поперечной гиперзвуковой волны, изучено ТРМБ. Это — первые результаты из обширной программы исследований, намеченной в этой области. Намечена также программа исследования ТРМБ в парамагнитных кристаллах.

Почти все зарубежные результаты исследования ТРМБ и КРС при фазовых превращениях в твердом теле собраны в последнем разделе книги. Оба эти вида рассеяния дают возможность следить за кинетикой фазовых превращений и поэтому особенно эффективны. Рассматривается рассеяние света на критических флуктуациях в твердом теле. Обсуждаются эксперименты по генерации гармоники в порошке нашатыря в области критической точки.

Исследованию рэлеевского и ТРМБ в нашатыре и $\alpha$-кварце при фазовом превращении посвящены обширные исследования. Интересные результаты получены также при изучении ТРМБ при фазовом ферроэлектрическом переходе в $KH_2PO_4$.

Приведены интересные результаты изучения вязко-упругой релаксации в линейных полимерах по ТРМБ.

В книге теоретически обсуждаются вопросы интерпретации низких частот КРС в кристалле льда, рэлеевского и КРС на поверхностных модах в ионных кристаллах, оптических процессов в жидком гелии, взаимодействие света с диэлектрическими кристаллами. Экспериментально изучается динамика кристаллической решетки в трех фазах твердого $KNO_3$.

Изложены и некоторые другие результаты.

Хотя бо́льшая часть материала трудов более или менее кратко публиковалась раньше, все собранное в одном томе представляет большую ценность для специалистов и для всех, кого серьезно интересует физика твердого тела.

*И. Л. Фабелинский*